

高邮养殖区罗氏沼虾中多环芳烃的残留现状与健康风险评价

徐志华^{1,2}, 朱晓华^{1,2*}, 葛筱琴^{1,2}, 耿雪冰^{1,2}, 刘崇万^{1,2}, 沈美芳^{1,2}

(1. 江苏省淡水水产研究所/江苏省渔业产品质量安全重点实验室, 南京 210017;
2. 江苏省水产质量检测中心/农业农村部渔业产品质量监督检验测试中心(南京), 南京 210017)

摘要: **目的** 对高邮市 9 个养殖区罗氏沼虾中多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbon, PAHs)的残留现状与健康风险进行分析。**方法** 样品中的多环芳烃由环己烷:二氯甲烷(1:1=V:V)混合溶液索氏提取, 经凝胶渗透色谱(gel permeation chromatography, GPC)净化后, 通过 DB35-MS 毛细管色谱柱分离, 采用电子轰击源选择反应监测模式进行质谱分析, 以内标法定量。根据残留量, 采用美国环保局(US environmental protection agency, USEPA)将风险模型与毒性结合的方式, 毒性当量因子(toxic equivalency factors, TEF)方法估算 PAHs 相对苯并(a)芘(BaP)的总毒性当量浓度, 采用终生致癌风险(increased lifetime cancer risk, ILCR)模型进行健康风险评价。**结果** 对 90 个样品进行了检测, 方法检出限为 0.017~0.171 $\mu\text{g/kg}$, 测定下限为 0.051 $\mu\text{g/kg}$, 加标回收率为 71.0%~117.0%, 相对标准偏差为 1.79%~8.24%。9 个养殖区 16 种 PAHs 组分总检出率在 100%, 范围在 6.62~53.2 $\mu\text{g/kg}$, 结构上 3 环、4 环作为优势组分含量较高, 致癌作用显著性的苯并[a]芘均未检出。养殖区 PAHs 来源为石油污染, 中高环同分异构体比值法进一步验证了污染源为石油。ILCR 范围在 $2.74 \times 10^{-10} \sim 3.30 \times 10^{-8}$ 。**结论** 致癌风险处于控制水平, 在可接受范围内。

关键词: 罗氏沼虾; 多环芳烃; 养殖区; 风险评价

Determination and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons residues in *Macrobrachium rosenbergii* in major aquaculture areas of Gaoyou city

XU Zhi-Hua^{1,2}, ZHU Xiao-Hua^{1,2*}, GE Xiao-Qin^{1,2}, GENG Xue-Bing^{1,2},
LIU Chong-Wan^{1,2}, SHEN Mei-Fang^{1,2}

(1. Reshwater Fisheries Research Institute of Jiangsu Province/Jiangsu Key Laboratory of Fishery Product Quality and Safety, Nanjing 210017, China; 2. Fishery Analysis & Testing Center of Jiangsu Province/Quality Control & Inspection Center for Domestic Fishery Products, Agricultural and Rural Ministry (Nanjing), Nanjing 210017, China)

ABSTRACT: Objective To analyze the residues and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in *Macrobrachium rosenbergii* in major aquaculture areas of Gaoyou city. **Methods** Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) were extracted by Soxhlet's method in cyclohexane-dichloromethane (1:1=V:V) mixed solution.

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目[CX(18)2011]

Fund: Supported by Agricultural Science and Technology Independent Innovation Fund of Jiangsu Province [CX(18)2011]

*通讯作者: 朱晓华, 硕士, 研究员, 主要研究方向为水产品质量安全检测与研究。E-mail: xhz824@sina.com

*Corresponding author: ZHU Xiao-Hua, Master, Professor, Reshwater Fisheries Research Institute of Jiangsu Province/Jiangsu Key Laboratory of Fishery Product Quality and Safety, Nanjing 210017, China. E-mail: xhz824@sina.com

After purification by gel permeation chromatography (GPC), PAHs were separated by DB35-MS capillary column. Samples were detected by mass spectrometry with electron bombardment source selection reaction monitoring mode, and quantified by internal standard method. According to the residues, the total toxicity equivalent concentration of PAHs relative to benzo [a] pyrene (BaP) was estimated by United States Environmental Protection Agency (USEPA) risk model and toxicity model, and then the lifetime carcinogenic risk (ILCR) model was used for health risk assessment. **Result** A total of 90 kinds of samples were tested. The limits of detection were 0.017–0.171 g/kg, and the lower limit was 0.051 g/kg. The recoveries of standard addition ranged from 71.0% to 117.0%, and the relative standard deviations ranged from 1.79% to 8.24%. The total detection rate of 16 PAHs components in 9 aquaculture areas was 100%, ranging from 6.62 to 53.2 $\mu\text{g/kg}$. Structurally, the content of 3 and 4 rings as dominant components was relatively high, and the benzo (a) pyrene with significant carcinogenic effect was not detected. Petroleum pollution was the source of PAHs in aquaculture area, and the ratio method of medium to high cyclic isomers further verifies that the source of PAHs was petroleum. The range of ILCR ranged was from 2.74×10^{-10} ~ 3.30×10^{-8} .

Conclusion Cancer risk is at a controlled level and within acceptable limits.

KEY WORDS: *Macrobrachium rosenbergii*; polycyclic aromatic hydrocarbons; aquaculture area; risk assessment

1 引 言

近年来,随着工业的高速发展,人类向环境中排放出的污染物越来越多,其中煤炭和石油的过度使用,使得多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbon, PAHs)在各种环境介质中广泛存在^[1-3]。尤其是长江沿岸经济较发达地区,长江水体中 PAHs 含量明显高于其他水域^[4]。江苏高邮市地处长三角洲,素有鱼米之乡的美誉,水产品十分丰富,罗氏沼虾便是高邮水产品的一大特色。作为全国罗氏沼虾重要产区之一,同时也是唯一的“全国罗氏沼虾标准化养殖示范区”,目前全市罗氏沼虾养殖面积占全国养殖面积的 1/4 以上,年产罗氏沼虾约 4 万吨,是高邮市的水产养殖支柱产业^[5]。然而随着养殖规模的不断扩大,高邮罗氏沼虾养殖水环境每况愈下,外河水严重富营养化。王军帅等^[4]认为我国目前多环芳烃主要研究领域在长江太湖等热点水域,而在重点水产品产区及养殖区污染监测缺乏系统性和全面性。因此本文以高邮养殖区为研究区,选取罗氏沼虾为研究对象,分析养殖区虾体内多环芳烃的残留现状,探索多环芳烃分布规律及来源,并采用美国环保环境保护(United States Environmental Protection Agency, USEPA)评价模式对罗氏沼虾使用安全进行健康风险评估^[6],以期了解高邮市主要养殖区域罗氏沼虾多环芳烃污染情况,为居民食用安全提供可靠的依据,为有关部门决策提供相关支持,有助于养殖环境保护和可持续开发利用。

2 材料与方法

2.1 仪器与设备

Agilent7890A/5975C 气质联用仪(美国 Agilent 公司); GPC-ULTR GPC 凝胶净化浓缩系统(德国 LC tech 公司);

R-81 脂肪测定仪、R-200 旋转蒸发仪(瑞士步琦公司); Allegra™ 21R 台式高速冷冻离心机(美国 Beckman 公司); XW-80A 微型涡旋混合仪(上海沪西分析仪器厂); Elix 5+Milli-Q Academic 纯水仪(美国 Millipore 公司); AE200 电子天平(感量 0.0001 g, 瑞士梅特勒-托利多公司); JY5002 电子天平(感量 0.01 g, 上海精天电子仪器厂); N-EVAP™111 氮吹仪(美国 Organomation 公司); KQ250B 超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司); Turbopap II 全自动浓缩工作站(英国 Caliper 公司)。

2.2 药品与试剂

16 种 PAHs 混合标准品(200 mg/L, 农业部环境保护科研监测所); 内标茈-d₁₂ 4.0 mg/L、茈-d₁₀ 4.0 mg/L、菲-d₁₂ 0.2 mg/L、茈-d₁₂ 4.0 mg/L(美国 Accustandard 公司); 环己烷、正己烷、乙酸乙酯、丙酮、二氯甲烷、甲醇(色谱纯, 美国 Tedia 公司); 氢氧化钾(分析纯, 南京化学试剂有限公司)。

2.3 样品采集、制备 及前处理

样品采集: 抽取高邮市界首镇(JZZ)、卸甲镇(XJZ)、汤庄镇(TZZ)、甘垛镇(GDZ)、开发区(KFQ)、龙虬镇(LQZ)、周山镇(ZZZ)、送桥镇(SQZ)、三垛镇(SUZ)共 9 个乡镇, 每个乡镇抽取 10 个样品, 共计 90 个样品。

样品制备: 选用罗氏沼虾, 虾体去壳, 取可食部分, 用高速万能粉碎机打成匀浆, 置于-20 °C 冰箱中冷冻贮存, 测定前将其室温解冻以供前处理使用。

样品前处理: 准确称取混合均匀的样品 5.00 g 放入滤纸筒内, 加入内标使用液, 向抽提器内倒入 100 mL 环己烷: 二氯甲烷(1:1, V:V) 混合溶剂加热等级 10 级, 时间 2 h, 将冷至室温的抽提液移至 250 mL 圆底烧瓶中, 40 °C 水浴旋转蒸发至 1 mL, 用环己烷: 乙酸乙酯(1:1, V:V) 混合液定容至 10.0 mL, 进行 GPC 净化, 收集流出液 1 mL, 供气相色谱-

质谱联用仪(gas chromatography-mass spectrometer, GC-MS)检测^[7,8]。

2.4 标准溶液及质量控制

标准溶液: 使用正己烷稀释 PAHs 混合标准溶液与内标标准溶液, 配制成含 16 种 PAHs 浓度为 1.0、5.0、25.0、50.0、100、250 μg/L, 内标浓度为 100 μg/L 的标准, 以标准溶液中被测组分峰面积和内标物质峰面积的比值为纵坐标, 标准溶液中各种 PAHs 的浓度和内标物质浓度的比值为横坐标。

质量控制: 为验证方法的可靠性, 用空白样品和并行样品对处理和测定过程进行质量控制与保证。

2.5 仪器工作条件

色谱条件: DB35-MS(30 m×0.25 mm, 0.25 μm); 进样口温度 260 °C; 载气为 99.999%高纯氮气; 不分流进样, 进样量 1 μL; 流量 1.0 mL/min; 柱升温程序: 初始温度 70 °C, 保持 1 min, 以 15 °C/min 升至 190 °C, 保持 1 min, 25 °C/min 升至 200 °C, 5 °C/min 升至 230 °C保持 4 min, 2.5 °C/min 升至 250 °C保持 3 min, 2 °C/min 升至 280 °C保持 3 min, 20 °C升至 310 °C保持 2 min。

质谱条件: EI 源; 离子源温度: 260 °C; 四极杆温度: 150 °C; 传输线温度 280 °C; 选择离子检测(selected ion recording, SIM) 模式; 各种 PAHs 及内标物的定性、定量离子见表 1。

GPC 条件: TACS TM 系统 TACS TM 参数: 油浴温度 40 °C, 流动相流速 5.0 mL/min, 样品定量环 5 mL, 前运行时间 1140 s, 主运行时间 2000 s, 后运行时间 120 s, 真空参数阶段 1: 170 mbar, 阶段 2: 210 mbar, 后运行时间 120 s。

2.6 健康风险评价

PAHs 健康风险评价是把环境污染与人体健康联系起来^[9], 目前多环芳烃健康风险及评价的方法较多, 评价模型主要有暴露模型、毒性模型、风险模型、无阈模型等^[10]。本文采用将风险模型与毒性结合的方式, 以风险度作为评价指标, 描述污染物对人体健康危害的风险。选用毒性当量因子(toxic equivalency factors, TEF)方法估算 PAHs 相对苯并(a)芘(BaP)的总毒性当量浓度即在进行致癌性风险评估时, 可以将虾体中多环芳烃浓度转化成 BaP 的毒性当量浓度, 等效因子是 BaP 等效转换系数(表 1)系数越大, 毒性越强^[11]。

采用终生致癌风险(Incremental life time cancer risk, ILCR) 模型评价罗氏沼虾 8 种致癌性多环芳烃化合物[苯并(a)蒽、屈、苯并(b)荧蒽、苯并(k)荧蒽、苯并(a)芘、二苯并(a, h)蒽、苯并(g, h, i)芘和茚并(1, 2, 3-cd)芘], 8 种为非致癌致瘤性多环芳烃化合物(蔡、苊烯、苊、茚、菲、蒽、荧蒽、芘)作致癌风险评价^[12]。

表 1 PAHs 的 BaP 等效因子
Table 1 Toxic equivalent factors (TEFs) of PAHs

PAHs	TEF	PAHs	TEF
Nap	0.001	Baa	0.100
Acy	0.001	Chr	0.010
Ace	0.001	Bbf	0.100
Flo	0.001	Bkf	0.100
Phe	0.001	Bap	1
Ant	0.01	Ind	0.100
Fla	0.001	DbA	5
Pyr	0.001	BghiP	0.100

$$TEQ_{BaP} = \sum_i^n C_i \times TEF_i \tag{1}$$

$$ILCR = \frac{TEQ_{BaP} \times DR \times ED \times SF \times EF \times CF}{BW \times AT} \tag{2}$$

(1)式中n=16, C_i为PAHs组分*i*在罗氏沼虾中的浓度, ng/kg; TEF_i为组分*i*的毒性当量因子(表 1)。

(2)式中 ILCR 为 PAHs 在某剂量下可致人群终生致癌风险; TEQ_{BaP} 为 PAHs 相对于 BaP 的等效致癌毒性, ng/kg; DR 为罗氏沼虾每天的摄入量, 根据扬州统计年鉴^[13]取值 3.6×10⁻³, kg/d; SF 为 BaP 的致癌风险系数经口暴露数值, 7.3 kg·d/mg; CF 为转换因子, 10⁻⁶ mg/ng; EF 为每年暴露天数, 取值 365 d; BW 为人体重, kg, 取值为 70 kg; AT 为人群的预期寿命, a, 选用扬州统计局^[14]取值 76 a; ED 对于非致癌物取 30 a, 对于致癌物取 70 a; AT 对非致癌物取 30 a (10950 d), 对于致癌物取 70 a (25550 d)。

3 结果与分析

3.1 罗氏沼虾中 PAHs 的含量及组成特征

在空白样品中加标浓度为 1.0、5.0、25.0 μg/kg, 加标回收率为 71.0%~117.0%, 相对标准偏差为 1.79%~8.24%。方法检出限为 0.017~0.171 μg/kg, 测定下限为 0.051 μg/kg。

检测 90 份罗氏沼虾样品, 9 个组 16 种组分总检出率在 100%, 总 PAHs 范围在 6.62~53.2 μg/kg, 致癌作用显著性的苯并[a]芘均未检出(见表 2)。三角图解法利用不同燃烧过程释放的 PAHs 的组成和相对含量差异来判定其来源, 是常用的 PAHs 源分析定性方法^[15,16], 因此本文采用三角图解法分析。结果发现罗氏沼虾含量以 2~4 环为主, 5~6 环均低于检出限视为未检出(N.D), 不同环数 PAHs 所占总量的百分比(质量分数, 下同)呈现出很相似的特征比例, 整齐趋势显示 4 环>3 环>2 环(见图 1), 其中 3 环、4 环作为优势组分含量较高, 与王保锋等^[16]提出的春季和夏季水产品中环和高环 PAHs 富集程度较高的结论相似; 与程远梅等^[17~20]沉积物中 3、4 环结构含量较高的结论具有相关性。2 环检出率达到

100%, 含量在 1.93~10.5 $\mu\text{g/kg}$; 3 环中, 芴、菲检出率 100%, 芴检出率 88.9%, 菲平均含量最高, 范围在 1.24~19.3 $\mu\text{g/kg}$; 4 环中, 荧蒽检出率达到 100%, 且含量在 2.57~10.1 $\mu\text{g/kg}$, 芘检出率达到 87.5%, 含量在 ND~11.6 $\mu\text{g/kg}$ 。

3.2 来源分析

PAHs 环数的相对丰度在一定程度上能够反映其污染来源^[17], 低相对分子质量(low molecular weight, LMW, 2~3 环的 PAHs)/高相对分子质量(high molecular weight, HMW, 4~6 环的 PAHs)可作为分析 PAHs 大概来源的一项指标。如果 LMW/HMW>1, 表示 PAHs 主要来源于石油源; 如果 LMW/HMW<1, 表示 PAHs 主要来源于燃烧源^[21-23]。表 3 分析结果发现, 本文中抽取的样品 LMW/HMW 均大于 1(1.07~2.19), 表明罗氏沼虾中 PAHs 主要来源于石油污染。卢腾腾等^[22]认为采用中高环同分异构体比值法, 能够进一

步确认该样品的来源, 特别指出荧蒽/芘更能很好的保存原始信息, 因此本文选取荧蒽/芘比值参数作为进一步分析罗氏沼虾中多环芳烃的来源。荧蒽/芘(FA/PY)比值小于 1 时, 表明样品的 PAHs 指示石油源, 荧蒽/芘(FA/PY)比值小于 1 时, 表明样品的 PAHs 指示燃烧源^[17,22]。9 组中荧蒽/芘比值在为 NC(没有检测到某种组分而使比值无法计算)~0.96, 结果进一步验证了罗氏沼虾中 PAHs 主要来源为石油污染。李静雅等^[23]认为长江三角洲尤其是工业发达地区污染水平高, 工业活动剧烈, PAHs 污染水平明显高于山区、远郊区和农业用地, 这一结论与本文所得结果相似, 本次实验数值较高的 JSZ 组、KFQ 组、LQZ 组、SQZ 组, 分析这几组发现周边或是主要靠近城市居民生活区域, 或是养殖区附近有化工厂, 这可能与当地化工厂含油废水及污染排放过程中产生 PAHs 污染有关。

表 2 高邮市各养殖区罗氏沼虾中 16 种 PAHs 含量($\mu\text{g/kg}$)																	
Table 2 Concentrations of 16 species PAHs in <i>Macrobrachium rosenbergii</i> in different aquaculture areas of Gaoyou city ($\mu\text{g/kg}$)																	
浓度	萘	苊烯	苊	芴	菲	蒽	苯并(a)蒽	屈	荧蒽	芘	苯并(b)荧蒽	苯并(k)荧蒽	苯并(a)芘	茚酚(1,2,3-cd)芘	二苯并(a,h)蒽	苯并(g,h,i)芘	总含量
环数	2 环 PAHs	3 环 PAHs	3 环 PAHs	3 环 PAHs	3 环 PAHs	3 环 PAHs	4 环 PAHs	4 环 PAHs	4 环 PAHs	4 环 PAHs	5 环 PAHs	5 环 PAHs	5 环 PAHs	5 环 PAHs	6 环 PAHs	6 环 PAHs	
JSZ 组	3.68	ND	0.22	1.24	16.0	ND	0.29	ND	8.30	11.1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	40.8
XJZ 组	4.05	ND	0.68	0.24	3.86	ND	ND	ND	4.38	2.51	ND	ND	ND	ND	ND	ND	15.7
TZZ 组	3.72	ND	2.63	2.33	6.19	ND	0.91	0.40	5.68	5.93	ND	ND	ND	ND	ND	ND	27.8
GDZ 组	3.29	ND	0.46	1.32	11.7	ND	0.30	ND	5.27	5.62	ND	ND	ND	ND	ND	ND	28.0
KFQ 组	10.5	ND	ND	6.71	19.3	ND	ND	ND	6.30	10.4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	53.2
LQZ 组	3.76	ND	0.48	2.82	14.5	ND	ND	ND	8.72	10.9	ND	ND	ND	ND	ND	ND	41.2
ZZZ 组	1.93	ND	0.08	0.63	1.24	ND	0.17	ND	2.57	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	6.62
SQZ 组	3.70	ND	0.30	3.21	16.5	ND	ND	ND	10.14	11.6	ND	ND	ND	ND	ND	ND	45.4
SDZ 组	3.15	ND	0.09	0.15	3.24	ND	ND	0.08	2.68	3.15	ND	ND	ND	ND	ND	ND	12.5
平均含量	4.20	ND	0.62	2.07	10.29	ND	0.42	0.24	6.00	7.64	ND	ND	ND	ND	ND	ND	

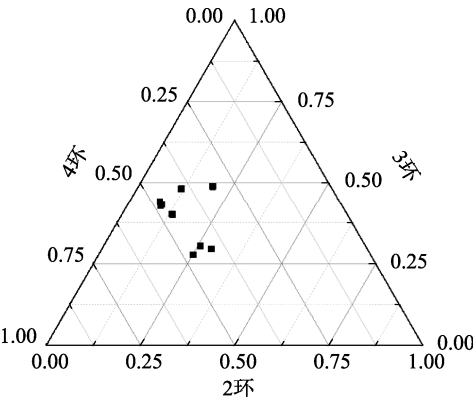


图 1 各养殖区不同环数 PAHs 所占比例三角图
Fig.1 Triangular chart of the proportion of PAHs with different rings in each aquaculture area

3.3 健康风险评价

依据 USEPA 对 ILCR 的潜在致癌风险区间, 当 ILCR $\leq 10^{-6}$ (a-1)时表示风险可以承受, 不需采取进一步的措施; 当 ILCR $> 10^{-4}$ (a-1)时表示已经超过可承受的癌症风险水平上限, 风险是不可接受的, 必须要采取相应的行动; 当 ILCR 介于二者之间时, 则风险水平高于日常风险, 具有潜在的致癌风险, 但还未达到优先级风险水平^[24]。应用此方法, 由表 4 可知目前高邮市罗氏沼虾养殖区风险值在 $2.74 \times 10^{-10} \sim 3.30 \times 10^{-8}$ 在可接受范围内, 说明高邮市各养殖区罗氏沼虾处于致癌风险控制水平。

4 结 论

本文以高邮市 9 个乡镇主要养殖区 90 个罗氏沼虾为

表 3 养殖区各组(LMW/HMW)和(荧蒽/芘)比值
Table 3 Ratio of LMW/HMW and fluoranthene/pyrene in each group of aquaculture area

	JSZ 组	XJZ 组	TZZ 组	GDZ 组	KFQ 组	LQZ 组	ZZZ 组	SQZ 组	SDZ 组
LMW/HMW	1.07	1.28	1.15	1.50	2.19	1.10	1.42	1.09	1.12
荧蒽/芘	0.75	NC	0.96	0.94	0.61	0.80	NC	0.88	0.85

表 4 各养殖区 PAHs 基于 BaP 的毒性当量和终身致癌风险
Table 4 Toxicity equivalence and lifelong carcinogenic risk of PAHs based on BaP in aquaculture areas

组别	致癌	非致癌	终生致癌风险(ILCR)		
	TEQBAP/(ng/kg)	TEQBAP/(ng/kg)	8 种致癌性 PAHs(a-1)	8 种非致癌性 PAHs(a-1)	∑ILCR(a-1)
JSZ 组	29.4	40.5	1.01E-08	1.40E-08	2.42E-08
XJZ 组	—	16.7	—	5.78E-09	5.78E-09
TZZ 组	95.4	265	3.30E-08	9.15E-09	4.21E-08
GDZ 组	29.6	27.7	1.02E-08	9.56E-09	1.98E-08
KFQ 组	—	53.2	—	1.84E-08	1.84E-08
LQZ 组	—	41.2	—	1.43E-08	1.43E-08
ZZZ 组	17.0	6.5	5.88E-09	2.23E-09	8.11E-09
SQZ 组	—	45.4	—	1.57E-08	1.57E-08
SDZ 组	0.8	12.5	2.74E-10	4.31E-09	4.58E-09
平均含量	44.2	30.9	1.53E-08	1.07E-08	2.60E-08

样本, 分析了罗氏沼虾的含量组成、来源、健康风险, 结果发现:

(1) 16 种 PAHs 组分总检出率在 100%, 总 PAHs 范围在 6.62~53.2 μg/kg, 致癌作用显著的苯并(a)芘均未检出; 组分含量以 2~4 环为主, 5~6 环均低于检出限, 3 环、4 环作为优势组分含量较高。

(2) 16 种 PAHs 组分主要来源为石油污染, 实验数值较高的 JSZ 组、KFQ 组, LQZ 组、SQZ 组, 分析这几组发现周边或是主要靠近城市居民生活区域, 或是养殖区附近有化工厂, 这可能与当地化工厂含油废水及污染排放过程中产生 PAHs 污染有关。

(3) 养殖区罗氏沼虾处于致癌风险控制水平。ILCR 在 2.74×10^{-10} ~ 3.30×10^{-8} 在可接受范围内。水产品多环芳烃评估所使用的模型大多数是国外研究的, 由于国内人在膳食结构寿命等有所差异, 因此在风险评估具体参数会有所偏离, 因此应完善针对罗氏沼虾中多环芳烃生物有效性的相关资料, 为开展风险评估提供可靠的数据支撑。

参考文献

[1] Kensaku K, Haruna N, Yoshimasa K. Atmospheric chlorinated polycyclic aromatic hydrocarbons in East Asi [J]. Chemosphere, 2014, 111: 40–46.
[2] Inderpreet SG, Rashmi S, Satnam S, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in some grounded coffee brands [J]. Environ Monit Assess,

2013, 185: 6459–6463.
[3] 徐正国, 唐秋萍, 王颖. 不同氧化剂对某煤制气厂多环芳烃污染土壤的修复效果研究[J]. 环境工程, 2016, 34(S1): 988–992.
Xu ZG, Tang QP, Wang Y. Study on the rehabilitation effect of different oxidants on polycyclic aromatic hydrocarbons contaminated soil in a coal gas plant [J]. Environ Eng, 2016, 34(S1): 988–992.
[4] 王军帅, 钱卓真, 吴萍萍, 等. 水产品中多环芳烃的污染和健康风险评估模型研究进展[J]. 福建水产, 2015, 37(1): 79–88.
Wang JS, Qian ZZ, Wu PP, et al. Advances in pollution and health risk assessment models of polycyclic aromatic hydrocarbons in aquatic products [J]. Fujian Fish, 2015, 37(1): 79–88.
[5] 蔡媛媛. 高邮湖河蟹网围套养罗氏沼虾技术的研发[D]. 扬州: 扬州大学, 2018.
Cai YY. Research and development of enclosure culture technology of *Macrobrachium rosenbergii* with river crab net in Gaoyou lake [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018.
[6] US EPA. Guidance on cumulative risk assessment Part 1.planning and scoping [R]. Washington DC: US EPA, 1997.
[7] 李斌, 刘昕宇, 解启来, 等. 自动自动索氏抽提-凝胶渗透色谱(GPC)-气相色谱/质谱法测定沉积物中多环芳烃和有机氯农药[J]. 环境化学, 2014, 33(2): 236–242.
Li B, Liu XY, Xie QL, et al. Determination of PAHs and organochlorine pesticides in sediments by automatic Soxhlet extraction gel permeation chromatography (GPC)-GC/MS [J]. Environ Chem, 2014, 33(2): 236–242.
[8] 甘志永, 于佩, 徐蕾. 加速溶剂萃取-GPC净化-GC-MS/MS测定土壤中的 16 种多环芳烃[J]. 环境科技, 2018, 31(2): 60–64, 69.

- Gan ZY, Yu P, Xu L. Accelerated solvent extraction-GPC-GC-MS/MS determination of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons in soil [J]. Environ Sci Technol, 2018, 31(2): 60–64, 69.
- [9] 吴焕波. 区域大气环境污染源人体健康风险评估方法研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- Wu HB. Study on the human health risk assessment method for regional atmospheric pollution sources [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.
- [10] 刘薇薇, 塔娜, 赵星华, 等. 我国环境中多环芳烃的健康风险评估进展[J]. 环境与健康杂志, 2014, 31(12): 1104–1108.
- Liu WW, Ta N, Zhao XH, *et al.* Progress in health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in China [J]. J Environ Health, 2014, 31(12): 1104–1108.
- [11] 李鹏, 张波, 王玮, 等. 基于“四步法”的健康风险评估研究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(S1): 553–556.
- Li P, Zhang B, Wang W, *et al.* Progress in health risk assessment based on the "four-step method" [J]. Populat, Resour Environ, 2016, 26(S1): 553–556.
- [12] 贾成俊, 赵淑莉, 翟超英, 等. 农村饮用水中多环芳烃的致癌风险评估[J]. 环境与健康杂志, 2015, 32(12): 1087–1091.
- Jia CJ, Zhao SL, Zhai CY, *et al.* Carcinogenic risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in rural drinking water [J]. J Environ Health, 2015, 32(12): 1087–1091.
- [13] 扬州市统计局. 2017 扬州统计年鉴[EB/OL]. [2017-10-01]. <http://tjj.yangzhou.gov.cn/nj2017/p4-5.htm>.
- Yangzhou Statistical Bureau. Yangzhou statistical yearbook 2017 [EB/OL]. [2017-10-01]. <http://tjj.yangzhou.gov.cn/nj2017/p4-5.htm>.
- [14] 扬州市统计局. 扬州市人口平均预期寿命[EB/OL]. [2016-12-13]. <http://tjj.yangzhou.gov.cn/yztj/tjxx1/201612/24fc5bfb6ee54d849bb7f3f74b498bf4.shtml>.
- Yangzhou Statistical Bureau. Average life expectancy of population in Yangzhou [EB/OL]. [2017-10-01]. <http://tjj.yangzhou.gov.cn/yztj/tjxx1/201612/24fc5bfb6ee54d849bb7f3f74b498bf4.shtml>.
- [15] 芦敏, 袁东星, 欧阳通, 等. 厦门岛表土中多环芳烃来源分析及健康风险评估[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2008, (3): 451–456.
- Lu M, Yuan DX, Ouyang T, *et al.* Source analysis and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in topsoil of Xiamen island [J]. J Xiamen Univ (Nat Sci Ed), 2008, (3): 451–456.
- [16] 王保锋, 翁佩芳, 段青源, 等. 宁波居民食用水产品中多环芳烃的富集规律及健康风险评估[J]. 现代食品科技, 2016, 32(1): 304–312.
- Wang BF, Weng PF, Duan QY, *et al.* The enrichment regularity and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in edible aquatic products of Ningbo residents [J]. Mod Food Sci Technol, 2016, 32(1): 304–312.
- [17] 郑关超, 郭萌萌, 赵春霞, 等. 环渤海地区养殖水产品中多环芳烃(PAHs)污染残留及健康风险评估[J]. 中国渔业质量与标准, 2015, 5(6): 20–26.
- Zheng GC, Guo MM, Zhao CX, *et al.* Pollution residues and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in aquaculture products in Bohai rim [J]. China Fish Qual Standard, 2015, 5(6): 20–26.
- [18] 国文, 薛文平, 姚文君, 等. 渤海表层沉积物中多环芳烃赋存特征及来源分析[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(3): 330–336.
- Guo W, Xue WP, Yao WJ, *et al.* Occurrence characteristics and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of the Bohai sea [J]. Marine Environ Sci, 2015, 34(3): 330–336.
- [19] 李加付, 刘少鹏, 刘相敏, 等. 渤海及邻近海域表层沉积物中多环芳烃的来源解析[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(3): 337–342, 353.
- Li JF, Liu SP, Liu XM, *et al.* Source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments of the Bohai sea and adjacent sea areas [J]. Marine Environ Sci, 2015, 34(3): 337–342, 353.
- [20] 程远梅, 祝凌燕, 田胜艳, 等. 海河及渤海表层沉积物中多环芳烃的分布与来源[J]. 环境科学学报, 2009, 29(11): 2420–2426.
- Cheng YM, Zhu LY, Tian SY, *et al.* Distribution and source of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of Haihe river and Bohai sea [J]. J Environ Sci, 2009, 29(11): 2420–2426.
- [21] 许云竹, 花修艺, 董德明, 等. 地表水环境中 PAHs 源解析的方法比较及应用[J]. 吉林大学学报(理学版), 2011, 49(3): 565–574.
- Xu YZ, Hua XY, Dong DM, *et al.* Comparison and application of PAHs source analysis methods in surface water environment [J]. J Jilin Univ (Sci Ed), 2011, 49(3): 565–574.
- [22] 卢腾腾, 林钦, 柯常亮, 等. 珠江口伶仃洋水域沉积物中多环芳烃及其生态风险评估[J]. 中国水产科学, 2012, 19(2): 336–347.
- Lu TT, Lin Q, Ke CL, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their ecological risk assessment in sediments of Lingdingyang waters in the Pearl River Estuary [J]. China Aquat Sci, 2012, 19(2): 336–347.
- [23] 李静雅, 吴迪, 许芸松, 等. 长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源[J]. 环境科学, 2016, 37(1): 253–261.
- Li JY, Wu D, Xu YS, *et al.* Recent distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in topsoil of the Yangtze River Delta [J]. Environ Sci, 2016, 37(1): 253–261.
- [24] 乌日娜, 金芬, 苏杭, 等. 北京地区食用植物油中多环芳烃污染特征与健康风险评估[J]. 中国油料作物学报, 2016, 38(6): 843–849.
- Wu RN, Jin F, Su H, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in edible vegetable oils in Beijing [J]. Chin J Oil Crops, 2016, 38(6): 843–849.

(责任编辑: 武英华)

作者简介

徐志华, 硕士, 工程师, 主要研究方向为水产品质量安全检测与研究。
E-mail: 243188769@qq.com



朱晓华, 硕士, 研究员, 主要研究方向为水产品质量安全检测与研究。
E-mail: xhz824@sina.com